空間選択光フィルタを用いた立体像再生

小林 哲郎, 中村 悠介, 中谷 智子, 高野 秀樹, 和田 洋亮

大阪大学大学院 基礎工学研究科 (〒560-8531 大阪府豊中市待兼山町1-3)

New Kind of Three-Dimensional Imaging Using a Spatial Light Filter

Tetsuro KOBAYASHI, Yusuke NAKAMURA, Tomoko NAKATANI,
Hideki TAKANO, and Yosuke WADA

Graduate School of Engineering Science, Osaka University, 1-3 Machikaneyama-Cho, Toyonaka, Osaka 560-8531

(Received October 21, 2002)

We have proposed a new kind of glasses-free three-dimensional imaging system that is capable of presenting a white cloud-like object as if it were an arbitrarily shaped color object by filtering and coloring light rays using a pinhole-array and a spatial-color-filter. Simple 3D images floating in the air at about 40 cm have been successfully generated as a result of the experiment with Fresnel lenses, though the generated images lacked clarity. On the other hand, comparatively clear 3D images have been generated by direct imaging without the Fresnel lenses.

Key Words: Three-dimensional image, Spatial light filter, Three dimensional display without glasses, Cloud-like object, Cross-talk free

1. はじめに

情報化社会において高品位な視覚情報の記録, 伝送, 表示が重要な役割を果たすことは言をまたない. 表示技術では, 近年高精細・大画面デバイスの研究開発に目覚ましいものがあり, 次に進むべき方向は立体化(3次元化, 3D化)であろう. 3次元画像表示については, 既に多くの方法が提案されされているが¹⁻⁵⁾, 実用にはまだ多くの問題点を抱えている.

従来の立体像記録再生技術は基本的には, 立体像を何らかの方法で記録し, これを再現して, それを観測者がそのまま観測するものと, 立体像を再現すると言うより, 見る位置で見え方が変わる視差型のものが代表的なものである.

前者の代表例ホログラフィは理想的な3次元立体像記録再生法(以下では3次元立体像を3D像と略す)である. ホログラフィでは物体からの光を波面情報として干渉縞の形で記録しているため, 光学系および記録媒体には光波長に近いピッチの空間分解能が必要とされる他, レーザのようなコヒーレント光源が少なくとも記録には必要である. このため, 非常に多くの画素数が必要で技術的にも問題がある上に, 高価で経済性に問題が生じる. 動画や複数波長を用いるカラー立体画像となればさらに大変であろう.

視差型のもっとも簡単なものは右眼用, 左眼用の平面像を記録し, 再生時に, 右眼用は右眼に, 左眼用は左眼でみえるように工夫したステレオスコープ方式である. ステレオ方式は簡便で高精細も容易であるが, 眼の位置を動かしても見え方が変わらず, 立体的に見えるが立体像を再現していない. また, 眼のフォーカス位置(画像が描かれた位置)と立体像が見える位置がずれているので眼の調節に無理が生じると言う欠点をもつ他, 多くは特別のメガネを必要とする.

ステレオスコープのもつ眼の不自然さを解決し, かつホログラフィの複雑さを避けるものとして, 多くの視点からの画像情報をとりこみ, 再生時には視点毎にその視点からの画像が観測できるようにした多視点, 多眼型の立体表示がある. その代表例が, インテグラルホログラフィ(IP)と多眼パララックスバリア方式とともにメガネは不要であり, また, コヒーレント光源を必要としないものである. IPは記録された多視点の2次元画像がレンズを介して, 元の物体近傍のある面に多重結像され, それらは観測方向に依存してその一部しか見えないが, 多重像全体では全体像が見えるものである⁶⁻⁸⁾ *. 一方, 多眼パララックスバリアではスクリーン全体に多視角からの像が記録されており, それが観測方向により見え方が異なっているものである¹⁻⁵⁾. 後者は, 実際の画像が記録さ

* これは古典的なIPの解釈である. 小口径レンズで合焦深度が深いため結像面が明確でないので, 多重像結像というよりむしろ光線再生的な像再生と解釈することもできる.

れているところと立体像としての位置は完全には一致しておらず、調節(眼のフォーカスに)に問題を生じる(IPでも三十三間堂を見通すような奥行きが深い像再生にはこの問題が生じる可能性がある)。IPはスクリーン上の画像のレンズを介した結像面の多視点、多重像を観測するものであり、他方、多眼パララックスバリア方式はスクリーン上の像をバリアの隙間からのぞき込むものである。両者は動作原理が全く異なっているが、現実のIPでは画素数不足や回折広がりなどから画像面から離れたところへの結像が困難で、本来の結像面近傍での再生より、IPの原理では動作しないはずの画像面やレンズ面近傍の像再生が用いられることも多く、これはIPと言うよりは多眼パララックスあるいは光線再生⁹⁻¹²⁾に近い。一方、これら多視点(あるいは多眼)方式に対しては、再生される光線密度が高く、再生立体像の各点から複数本の光線が眼に入るような場合(単眼視差がある場合で超多眼とも言われる)には調節の問題点が緩和することが分かっている^{13,14)}。

いずれにしても、現状ではまだ十分に実用となる3D像記録再生装置、システムは存在せず、その出現が待望されている。

2. 空間選択光フィルタを用いた 多眼立体像再生の原理

ここでは我々が新しく提案したフィルタ法の原理について述べることにする。まず、Fig. 1を見てみよう。白色光源が照射された白い雲状の半透明散乱物体をレンズ系(今、便宜的に2枚のレンズにしている)で結像させたもの

Fig. 1 Imaging of a real 3D object through a lens system.
(a) A direct image. (b) Through a pinhole array.

を観測者が観測している。Fig. 1(a)で示されるように十分に大きい口径のレンズの場合、観測者は白い雲状物体の像を3次的に見ることができる。次にこのレンズ系の中にFig. 1(b)のように2次元のピンホールアレイをおく。結像に係わる光線はピンホールを通過するものに限られその数は激減するが、やはり白い雲状物体の像が観測される。ピンホールアレイは分布型の絞りのようなものである。

次にFig. 2(a)に示すようにピンホールアレイの手前(観測者側)に空間フィルタをおく。もし、この空間フィルタ一面が青色のみを通過させるカラーフィルタなら、白い雲は青い雲に変わる。つまりこのフィルタは色を付ける機能を持っている。次に、白色雲状物体内部にある物体(図では直方体)を想定してみる。まず、フィルタのある点からピンホールを結ぶ直線に沿って進む光線を考え、レンズを介して白色雲状物体内部まで進め、想定した物体に突き当たらない場合には(図では L_1)このフィルタの一点を不透明にする。同様にして想定した物体に当たる場合は(図では L_2)、その部分の色の光線に対して透明にする。これを、フィルタ全面に行うと、Fig. 2(a)に示すように観測者は白色雲状物体の像全体を見ることができず、その代わりに想定したある物体の部分(図では直方体)だけが色づけされて見えることになる。つまり、空間フィルタは色づけ以外に白色雲状物体の特定の場所を選択する機能も併

Fig. 2 Conversion from a white cloud-like object to 3D images. (a) An example of simple case (hexahedron).
(b) A general image.

せもっている。この機能を細かく使っていけば、白色雲状物体内に収まる任意の形状と色をもった任意の3次元物体にまで拡張が可能である。これがこの空間選択光フィルタを用いた多眼立体像再生法の原理である¹⁵⁾。なお、Fig. 2(a)のPとQのように物体の2点からの光線が重なる場合は手前のQを優先してフィルタの色を決めている。

この3次元像再生は現実にある3次元物体(白色雲状物体)を変形させているものの実際に結像させており、視差像を見せたり、多視角視差像を合成したりする従来の多視角パララックス法やIPとは構成は似てはいるが原理は本質的に異なっている。また、部分的にせよ実在する物体の結像であるので、1点からの光線を1点に集めており、空間コヒーレンスが効果を持ち、像が鮮明になる可能性を持つ^{**}。もちろん、一つのピンホールに特定の方向から来る光線には問題とする点以外からの光線も含まれるので、空間的にインコヒーレントな光線による再生像も共存することになり、総合的には何とも言えない。

レンズ無し構成

背面の白色雲状物体内部に3次元物体を形作ることも可能である。この場合Fig. 3のような構成となり、レンズ系は不要になる。ここでは、空間フィルタにより白色雲状物体のある部分は遮蔽されて見えなくなり、うまい具合に所望の3次元物体の形状の部分だけが残されて見え、観測者にはそこにそのような3次元物体が存在しているように見えるのである。

空間フィルタの実体

白色雲状物体が実際の3次元物体であるとし、その3次元像をレンズ系で写し観測者が観測している場合を考え、そのときの空間フィルタ面上にどのような画像情報が投影されているかを想定すればよい。するとこれは多眼ピンホールカメラに対応するので、空間フィルタにはそれぞれのピンホールから見た多視点画像が描かれていることになり、白色雲状物体がレンズより離れているときは、IPと同様のフィルタになる(ただし画像の反転は不要)。また、白色雲状物体がレンズに近い場合(正確にはピンホールアレイに近い場合である。この他、白色雲状物体のレンズによる像がピンホールアレイ近くにできている場合も同様である)は、(左右、上下視差のある)多眼パ

Fig. 3 Scheme of a lensless 3D imaging system.

Fig. 4 Experimental setup.

ララックスバリアの場合の画像に近いものがフィルタ上に描かれていると予想される。

3. 実験及び実験結果

3.1 実験装置

Fig. 4に実験装置を示す。白色雲状物体は水に白い絵の具を溶かしたもので、透過度が10 cm程度になるような濃さにしている。白色光源としてプロジェクタランプを用い、これに横からを照射し散乱させている。ピンホールアレイは0.2 mm径のピンホールを2.5 mm間隔に開けたものである。カラーフィルタとしてA4サイズのOHPフィルムを用いている。レンズは口径、及び焦点距離が30 cmのフレネルレンズを2枚用いている。カラーフィルタのフィルタ画像の作成は、散乱体内部に再現したい物体(この実験では2つの球)があるものとして、そこからの散乱光がレンズ、ピンホールを通過し、フィルタに到達したと考え、その光線軌跡でフィルタを着色して行った。再現したい物体を通過しない光線の軌跡のフィルタへの到達点は黒く塗りつぶして不透過としている。

3.2 実験結果

Fig. 5(a)はピンホールアレイ、および透過フィルタをは

Fig. 5 Photographs of white scattering object (nebulous water in a beaker) without (a) and with (b) a pinhole and a color filter.

^{**} 各ピンホールからの光線が干渉して全体としてはアレイの口径で決まる回折限界まで鋭く絞れるからである。

ずし、フレネルレンズ2枚のみで白色雲状物体(ピーカに入れている)をレンズ系を介して結像させた像をデジタルカメラで撮影したもので、Fig. 1(a)に対応したものである。同様にFig. 5(b)はピンホールアレイを間に挿入したものである。肉眼で見ると、像の質は低下するのであるが、この写真では逆に見える(Fig. 1(b)に対応する)。いずれにしてもこのピンホールアレイが白色雲状物体の画像情報を十分に伝え得ることが示された。

次に、この白色雲状物体に埋まる位置(下のレンズより30 cm下方)に青と赤の球が重なって(赤球が手前)存在するとして、透過フィルタを計算、作成し、ピンホールと一緒に挿入し、3次元像を再生した。肉眼でも3D画像が明瞭に観測された。Fig. 6(a)がその像にピントを合わせて撮影した写真である。かなり歪曲が生じている。このことは短焦点のフレネルレンズの焦点付近に置いた奥行き差の大きい物体の像であるため当然と言えよう。白色雲状物体(散乱物体)がコンパクトなため、ピンホールを通過する光線の広がりには比較的狭く、隣接するピンホールからの光線による偽の再生像(cross-talk image)は抑圧され、現れなかった(Fig. 7に光線広がりの様子を示す)。Fig. 6(b)は白色雲状物体、下部のレンズを取っ払い、ここに板状の白色散乱光源をおき、白色点光源アレイとしてフィルタを照射する光線再生型^{10,11)}の3D像再生で得た画像である。一点から出た光線が同一点に集光するというフィルタ法のようなことが起こっていないが、再生像の質に大きな変化は見られなかった。なお、(b)では光線の広がり角が大きいため再生像には偽像が生じている。

Fig. 8はFig. 6(a)に対応する再生像をデジタルカメラで

Fig. 6 Photographs of produced 3D images. (a) this method with a white cloud-like object (no cross talk). (b) using plane white backlight (images except for center are cross talk images).

Fig. 7 Suppression of cross-talk image due to narrow divergence of light-ray flux.

Fig. 8 Photographs of the obtained 3D images at various view angles.

方向を変えて撮影したものである。見る方向により見え方が変化していることがよく分かる。また、半透明紙を再生位置近傍で動かすと3D像が順に結像し、実際に像が再現されていることが確かめられた。

肉眼で見るとまだましであるがそれでもFig. 6(a), (b), Fig. 8のいずれの場合も再生像の質はよくない。フィルタから40 cm以上も飛び出たところの再生像であり、光線の回折効果による像の解像度の劣化とレンズの歪曲効果が大きな原因であろう。また、フレネルレンズを用いた結像には通常のレンズのような等距離性(光線到達時間の同一時間性)が消失しており、結像にコヒーレンス効果が現れないためかも知れないが、これらに対しては今後の詳しい検討が必要である。

フレネルレンズが余り良質でないので、レンズ無しの再生実験も行った。この場合は飛び出し画像ではなく白色雲状物体のところが直接違う形の再生像に変わって見える再生になる(Fig. 3に対応)。これによる再生像はFig. 9に示す。(a)は正面から、(b), (c)はそれぞれ右、左から撮影したもので、フレネルレンズを用いた場合に比べるとかなり鮮明になっている。これについても、大面積の薄い白色散乱板をピンホールのすぐ後ろに置いて再生したものと比較してみた。立体感はフィルタ法の方がよく出ていると感じられたが、格段に勝ると言い切れるほどにはないようである。白色雲状物体の透過度が低いと後方からの光線の寄与が低くなり白色散乱板に近づくことから、絵の具濃度を薄めもう少し雲状物体の透過度を上げた方がよりの確な差が出たのではという可能性も残っている。

Fig. 9 Photographs of the 3D images at various view angles (using lensless scheme; Fig. 3).

4. 考 察

以上のように、ピンホールアレイとカラーフィルタを用いた新しいタイプのメガネなし3次元画像再生を提案し、実験によりその動作の確認に成功した。偽像(cross-talk image)のない立体像を40 cmも飛び出させて再生することに成功したが、再生像は予想したほど鮮明ではなかった。また、点对応のない光線再生法と比較しても偽像が現れない以外には大きな差は見られなかった。予想したほど鮮明な像が再生できなかった原因として、フレネルレンズの歪曲、同時刻到達性の欠落がまず考えられ、レンズ無しの実験も行った。再生像はより鮮明になったがそれでも満足できるレベルに到達しておらず、光線の回折広がりが解決すべき一番の問題という結論を得た。画像情報が記録されているフィルタ面から離れた位置(飛び出しの大きなところ)への像再生は今回の方法のみならず、IP、多眼パララックスバリア、光線再生いずれの場合も回折などの問題点があり、光線を回折限界にまたその回折限界をいかに小さくするかが多視点、多眼型の3D画像表示の共通の課題であろう。フィルタに液晶パネルを用いた立体動画再生も今後進めて行きたいと考えている。

謝 辞

まず、この研究の元になるいくつかの研究を進めてくれた当時の大学院生の武田 勉、酒徳 耕平、尾西 朋洋君に謝意を表します。また、門外漢でこの分野ではアマチュアに近い我々のグループの研究に対して、日頃より適切なご示唆を頂いている千葉大学の本田 捷夫教授、三洋電機(株)の岸本 俊一、濱岸 五郎両氏に感謝の意を表しま

す。さらに、日頃、このテーマに対して議論をしていただいている本学光エレクトロニクス講座同僚の村田 博司講師、高原 淳一博士に感謝いたします。

参考文献

多眼パララックスバリア法、IPなど多眼方式をはじめとする立体画像再生全体については以下の1-5)の参考文献、および、それらに引用されている論文を参照されたい。

- 1) 大越 孝敬著：三次元画像工学(朝倉書店、1991)。
- 2) 志水 英二、岸本 俊一：ここまできた立体映像技術—究極のディスプレイを目指して—(工業調査会、2000)。
- 3) 畑田 豊彦：Nikkei Electronics **4** (1988) 444.
- 4) 井上 弘：立体視の不思議を探る(オプトロニクス社、1999)。
- 5) 3次元画像コンファレンス、講演論文集(～2002)毎年開催。
- 6) F. Okano, J. Arai, H. Hoshino, and I. Yuyama: *Proc. SPIE, Conference on Novel Optical Systems Design and Optimization II* **3430** (1998) 70.
- 7) J. Arai, F. Okano, H. Hoshino, and I. Yuyama: *Appl. Opt.* **37** (1998) 2034.
- 8) H. Hoshino, F. Okano, H. Isono, and I. Yuyama: *J. Opt. Soc. Am.-A* **15** (1998) 2059.
- 9) 小林 哲郎、今村 康之、井上 吉隆、森本 朗裕：春季第44回応用物理学会学術関係連合講演会予稿集(1997) 28p-ZQ-1.
- 10) 小林 哲郎、山本 浩史、武田 勉：秋季第61回応用物理学会学術関係連合講演会予稿集(2000) 4p-D-7.
- 11) 小林 哲郎：秋季第61回応用物理学会学術関係連合講演会予稿集(2000) 4p-D-8.
- 12) 尾西 朋洋、武田 勉、小林 哲郎：春季第48回応用物理学会学術関係連合講演会予稿集(2001) 30p-ZV-9.
- 13) T. Kajiki, H. Yoshikawa, and T. Honda: *Proc. The 3rd International Display Workshops (IDW'96)* **2** (1996) 489.
- 14) 須佐見 憲史、阿部 真也、梶木 善裕、圓道 知博、畑田 豊彦、本田 捷夫：3次元画像コンファレンス2000 (2000) P-10.
- 15) 小林 哲郎、武田 勉、酒徳 耕平：1999応用物理学会学術講演会予稿集(1999) 1a-ZH-6.